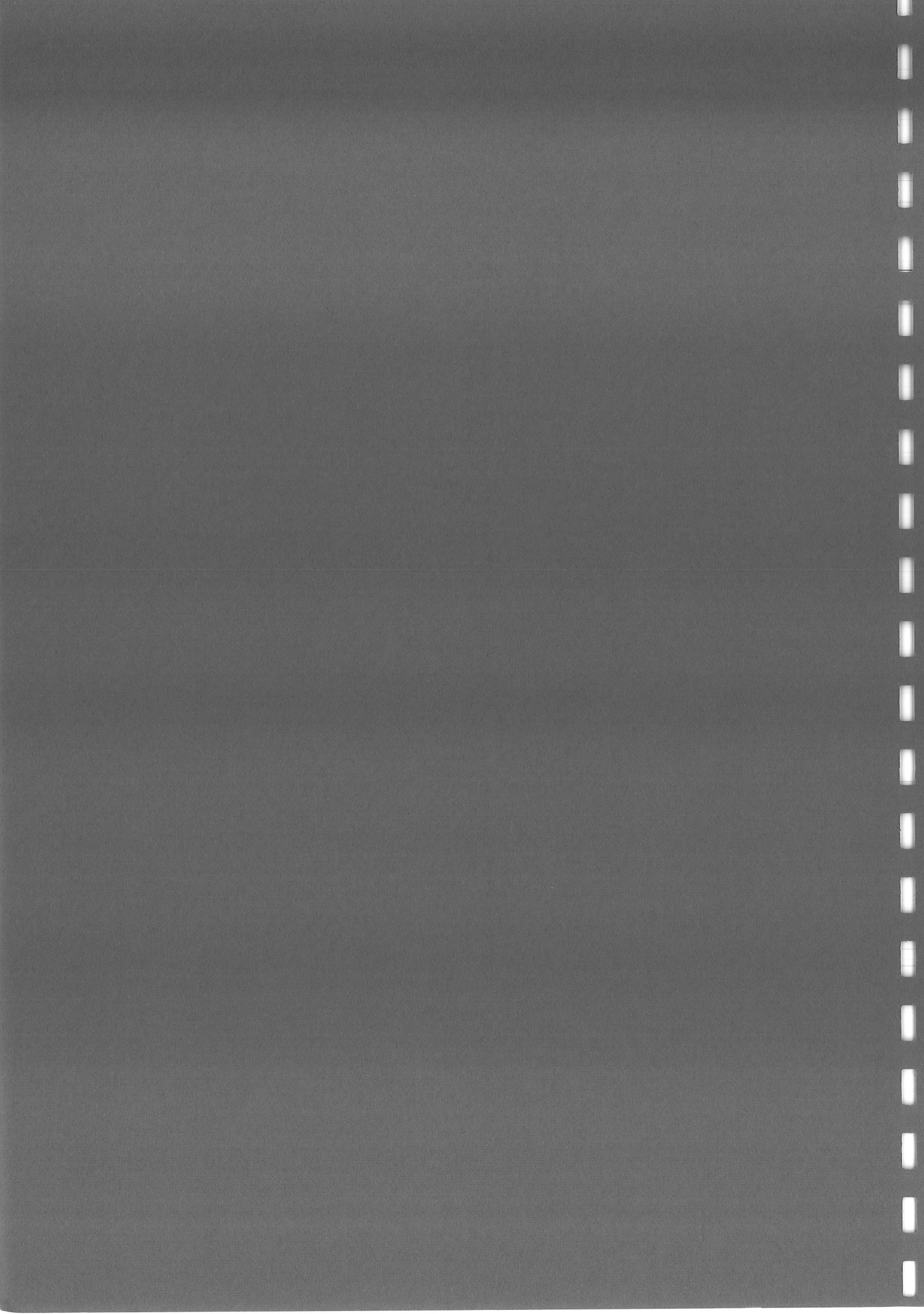


Application des bolomètres  
à l'analyse par faisceau d'ions

Alexandre BRONIATOWSKI



# APPLICATION DES BOLOMÈTRES À L'ANALYSE PAR FAISCEAU D'IONS

A. Broniatowski (\*)

Groupe de Physique des Solides (Universités Paris 6 et 7)  
2 Place Jussieu, 75251 Paris Cedex 05

1- Généralités sur la spectrométrie de rétrodiffusion  
Rutherford (R.B.S.)

2- L'intérêt des ions lourds en R.B.S.

2.1 Séparation en masse

2.2 Résolution en profondeur

2.3 Rendement de rétrodiffusion

3- La question du détecteur

3.1 Résolutions comparées des détecteurs à barrière  
de surface et des bolomètres pour la détection d'ions

3.2 Le straggling en énergie du faisceau;  
son incidence sur l'utilisation en R.B.S. des  
détecteurs à haute résolution en énergie

3.3 Cahier des charges du bolomètre: résolution en  
énergie et taux de comptage

4- Applications en Physique des surfaces

5- Le dispositif mis en place au Groupe de Physique des  
Solides:

5.1 Cryogénie, chambre en ultra-vide, montage  
- accélérateur

5.2 Expériences hors-faisceau: étude d'un bolomètre  
de test

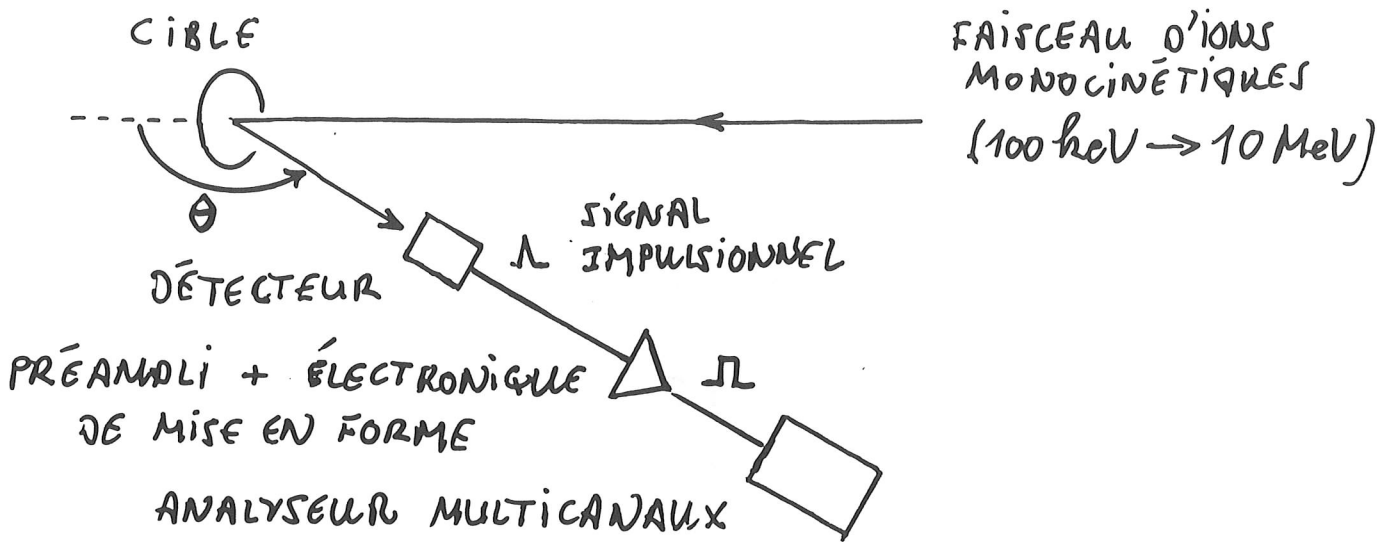
5.3 Perspectives

(\*) e-mail: [broniato@gps.jussieu.fr](mailto:broniato@gps.jussieu.fr)

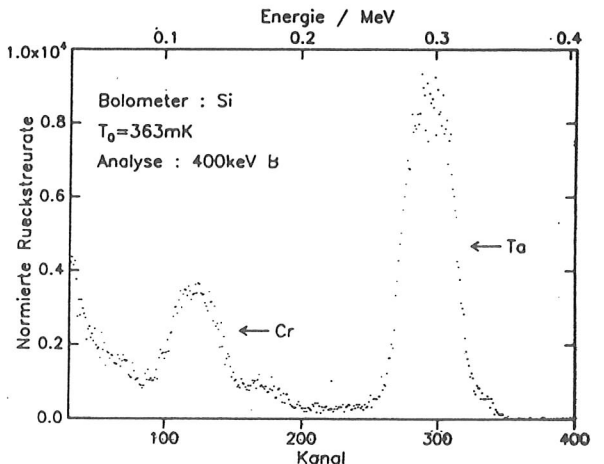
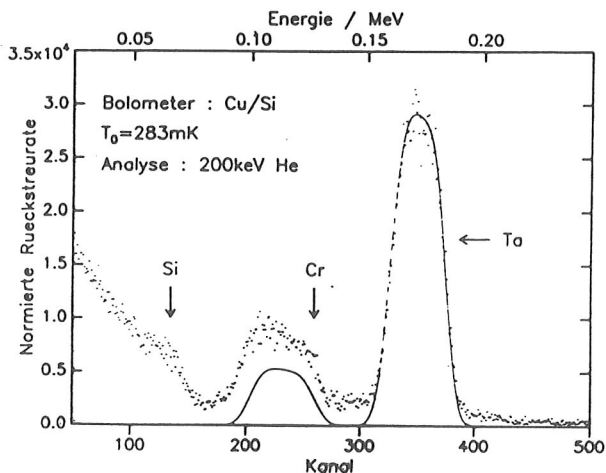
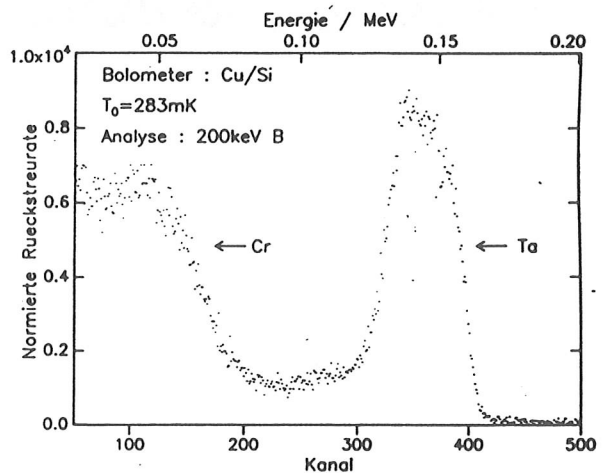
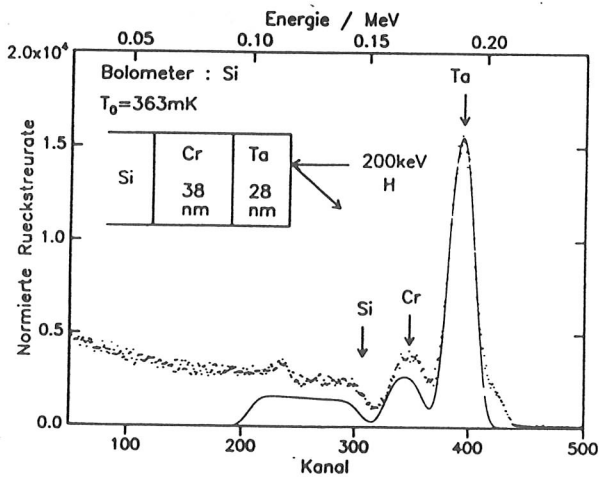


# SPECTROMÉTRIE DE RÉTRODIFFUSION RUTHERFORD (R.B.S.)

## 1- PRINCIPE



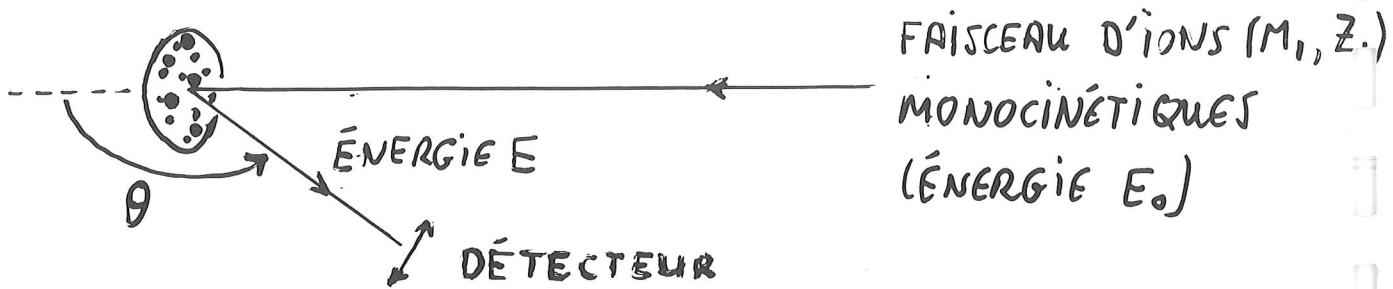
EXEMPLES DE SPECTRES R.B.S. OBTENUS SUR UNE CIBLE Si/Cr/Ta - DÉTECTEUR BOLOMÉTRIQUE À 300 mK.



(Woiwod 1989)

## 2- L'INTÉRÊT DES IONS "LOURDS" EN R.B.S.

### 2-1 SÉPARATION EN MASSE DES ATOMES DE LA CIBLE

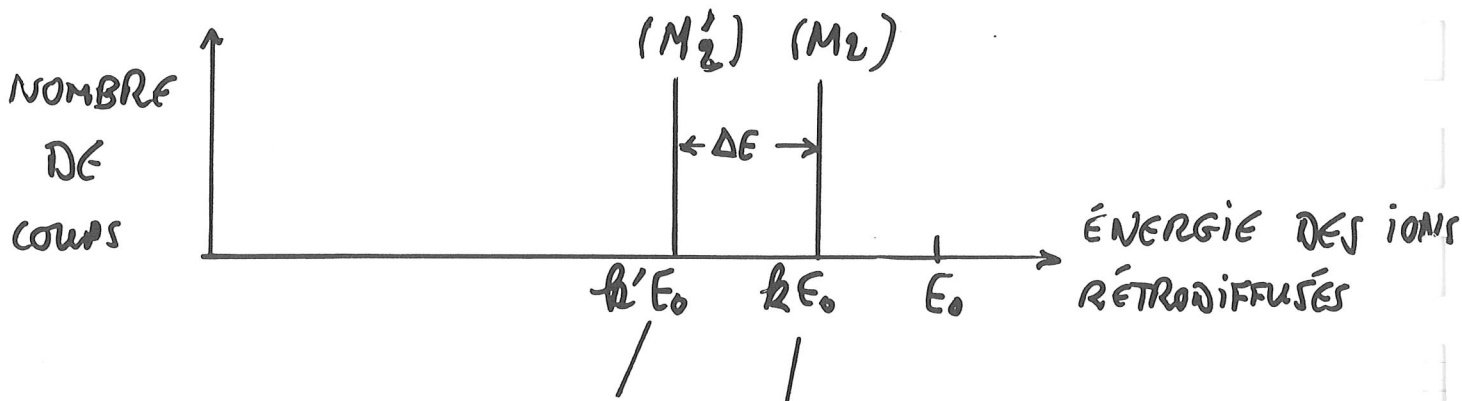


CIBLE MINCE COMPOSÉE DE 2 ESPÈCES D'ATOMES:  
( $M_2, Z_2$ ), ( $M'_2, Z'_2$ ) AVEC  $M_2 > M'_2$

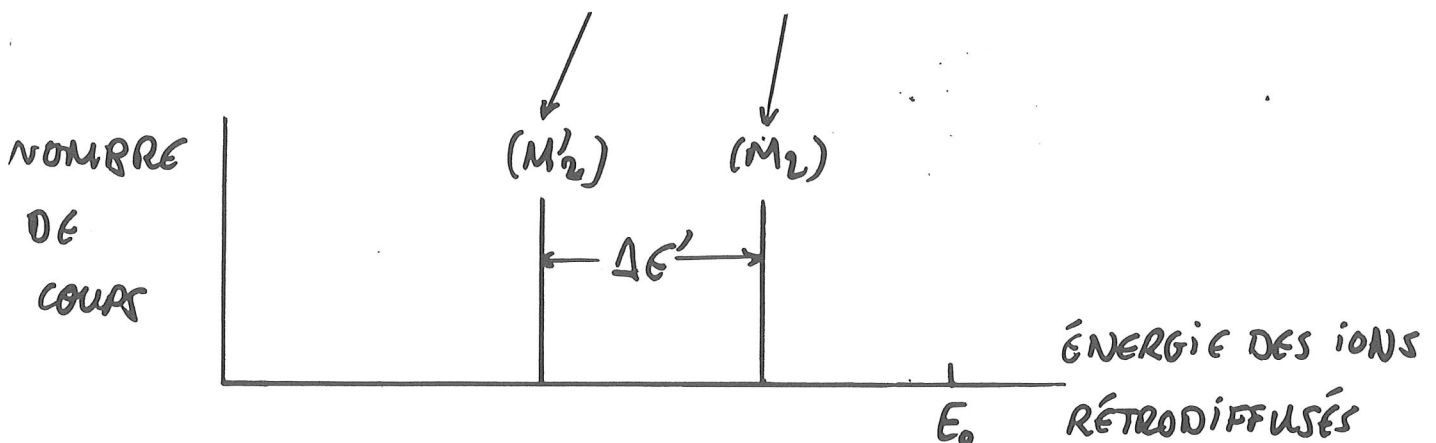
↳ LE FACTEUR CINÉMATIQUE

$$k = E/E_0 = (M_2 - M_1)^2 / (M_2 + M_1)^2 \quad (\theta = \pi)$$

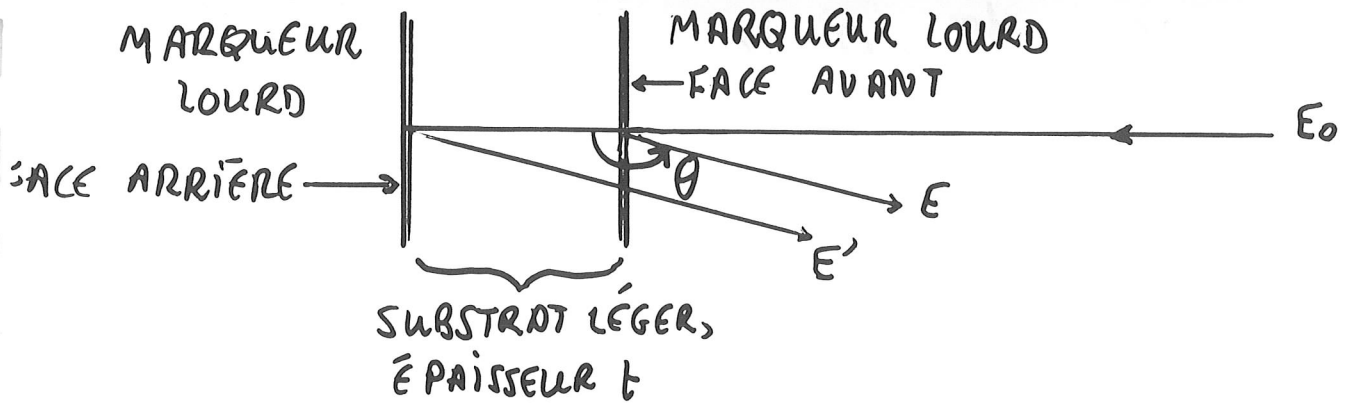
↳ SPECTRE DES RÉTRODIFFUSÉS POUR L'ION ANALYSEUR  $M_1$



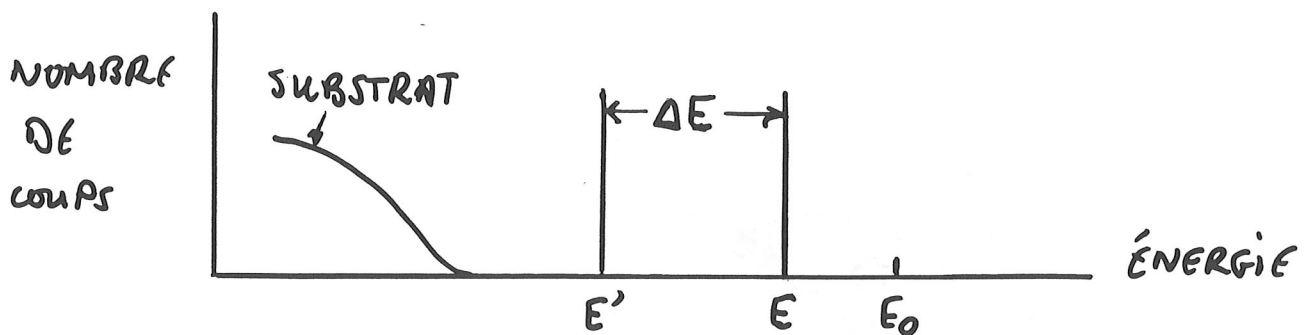
↳ SPECTRE POUR L'ION ANALYSEUR  $M'_1$  ( $M'_1 > M_1$ )



## 2.2 RÉSOLUTION EN PROFONDEUR DANS LA CIBLE



LE SPECTRE EN ÉNERGIE DES IONS RÉTRODIFFUSÉS



$\Delta E$  = PERTE D'ÉNERGIE DUE AUX COLLISIONS INÉLASTIQUES SUBIES PAR LES IONS A LA TRAVERSÉE DU SUBSTRAT

$$\Delta E = t \gamma \quad \text{où} \quad \gamma = k \left( \frac{dE}{dx} \right)_{in} + \frac{1}{|\cos \theta|} \left( \frac{dE}{dx} \right)_{out}$$

$\left( \frac{dE}{dx} \right)_{in}$  = POUVOIR D'ARRÊT DU SUBSTRAT A L'ÉNERGIE  $E_0$

$\left( \frac{dE}{dx} \right)_{out}$  = id. A L'ÉNERGIE  $kE_0$

CAS DES IONS RAPIDES (RÉGIME DE BETHE:  $v > Z_1 v_{schr}$ ):

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Z_1^2 e^4 n}{mv^2} \cdot \ln(2mv^2/I) \quad ; \quad \underline{\text{VARIE COMME } Z_1^2} \text{ A VITESSE DONNÉE}$$

où :  $n$  = densité électronique du substrat

$m$  : masse de l'électron

$I$  : énergie d'ionisation moyenne du substrat ( $I \sim 10Z_2$  (eV))

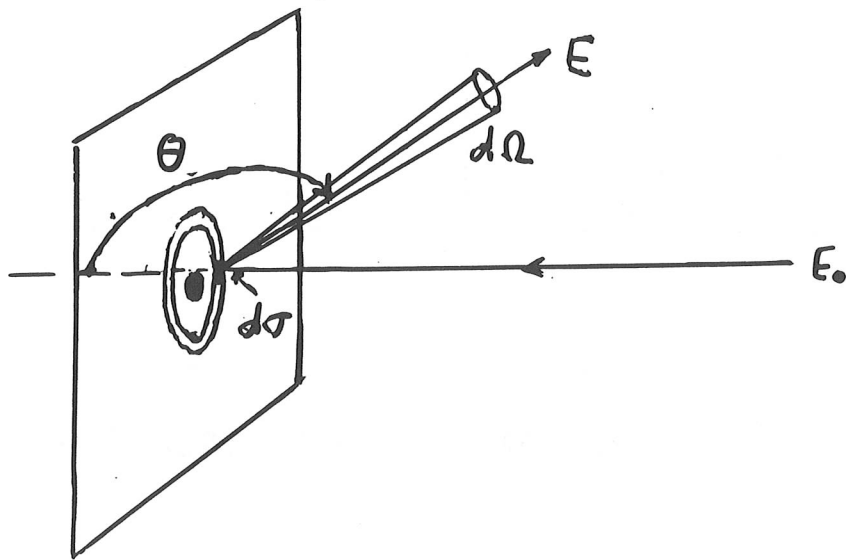
## 2.3 RENDEMENT DE RÉTRODIFFUSION

$$Y = \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \Omega \cdot N$$

$N$ : NOMBRE D'ATOMES ( $M_2, Z_2$ ) PAR UNITÉ D'AIRE DE LA CIBLE

$\Omega$ : ANGLE SOLIDE DU DÉTECTEUR

$d\sigma/d\Omega$ : SECTION EFFICACE DIFFÉRENTIELLE DE RÉTRODIFFUSION  
À L'ANGLE  $\theta$



- ⊙ CAS OÙ LE POTENTIEL D'INTERACTION EST COULOMBIEN  
(ION RAPIDE, DISTANCE MINIMUM D'APPROCHE  
≪ RAYON D'ÉCRAN DE L'ATOME-CIBLE) :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \left( Z_1 Z_2 e^2 / 4E_0 \right)^2 / \sin^4(\theta/2)$$

[FORMULE DE RUTHERFORD]. ⇒  $Y$  VARIE EN  $Z_1^2$

- ⊙ CONCLUSION: INTÉRÊT DES IONS "LOURDS" POUR  
LES RÉGÉNERATIONS EN MASSE ET EN PROFONDEUR,  
ET POUR LE RENDEMENT DE RÉTRODIFFUSION



### 3. LA QUESTION DU DÉTECTEUR

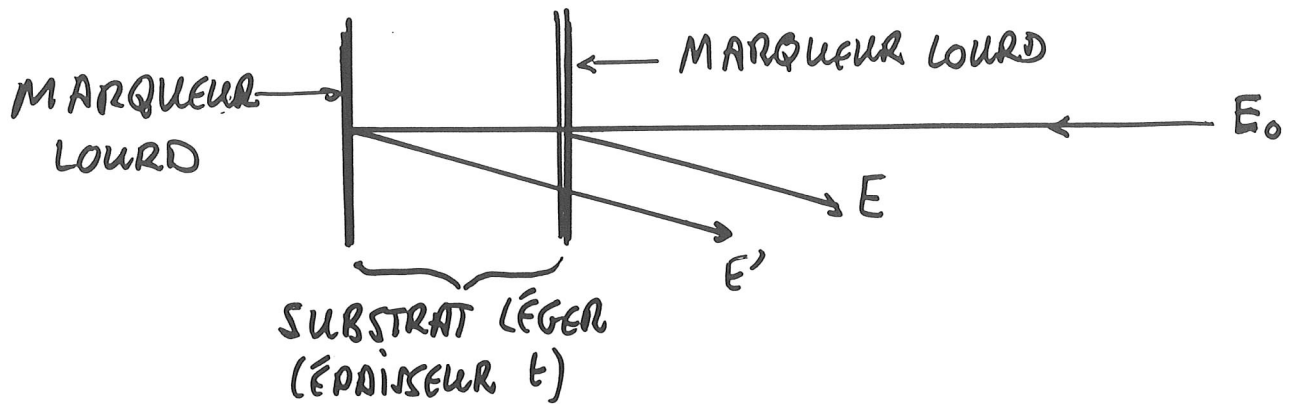
#### 3.1 RÉSOLUTIONS COMPARÉES DES DÉTECTEURS A BARRIÈRE DE SURFACE ET DES BOLOMÈTRES EN DÉTECTION D'IONS

	ION ANALYSEUR	RÉSOLUTION EN ÉNERGIE (keV)	RÉSOLUTION EN PROFONDEUR SUR CIBLE Au (Å) [ $\theta=110^\circ$ ]
DÉTECTEUR A BARRIÈRE DE SURFACE	$^1_1\text{H}$ (1MeV)	8 <sup>(1)</sup>	200
	$^4_2\text{He}$ (1MeV)	14 <sup>(1)</sup>	55
	$^{14}_7\text{N}$ (1MeV)	45 <sup>(1)</sup>	70
BOLOMÈTRE	$^{11}_5\text{B}$ (400keV)	16 <sup>(2)</sup>	250
	" "	1,2 <sup>(3)</sup>	20
	$^{14}_7\text{N}$ (1MeV)	2 <sup>(3)</sup>	3 (~ 1 MONOCOUCHE ATOMIQUE)

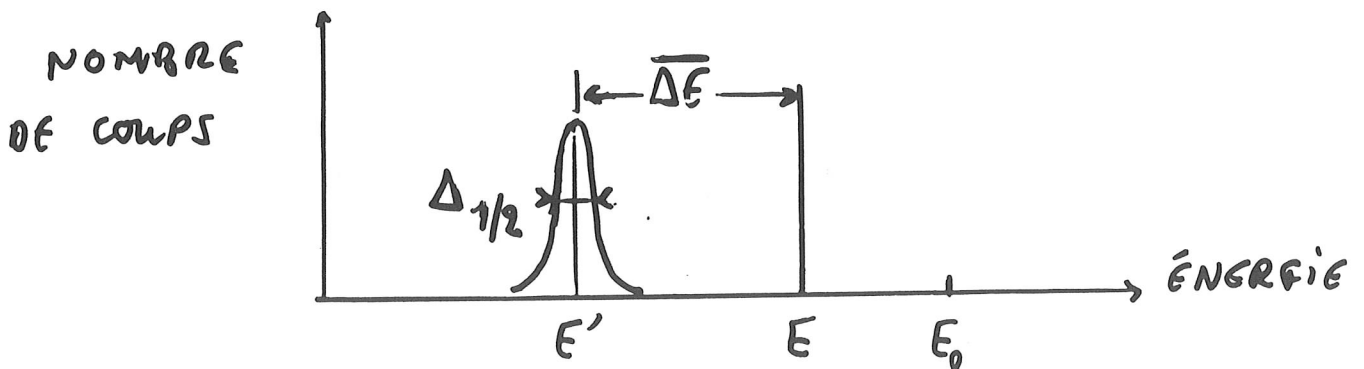
(<sup>1</sup>): MESURÉE; (<sup>2</sup>): MESURÉE (WOIVOD, 1989); (<sup>3</sup>): THÉORIQUE

⇒ RÉSOLUTION - EN PRINCIPES - POSSIBLE A L'ÉCHELLE DE LA MONOCOUCHE ATOMIQUE EN PROFONDEUR DANS LA CIBLE !

### 3.2 LE STRAGGLING EN ÉNERGIE DU FAISCEAU; SES CONSÉQUENCES SUR L'EMPLOI DES DÉTECTEURS A HAUTE RÉOLUTION EN ÉNERGIE



- STRAGGLING: DÉGRADATION DE LA RÉOLUTION EN ÉNERGIE DU FAISCEAU AVEC LA PROFONDEUR DANS LA CIBLE.
- LE SPECTRE EN ÉNERGIE DES IONS RÉTRODIFFUSÉS



\* PERTE D'ÉNERGIE MOYENNE DES IONS DANS LA CIBLE:  
 $\overline{\Delta E} = \gamma t$  où  $\gamma \propto \frac{dE}{dx}$ , POUVOIR D'ARRÊT (BETHE)

\* DISPERSION AUTOUR DE LA MOYENNE:

$$\Delta_{1/2} = 2,35\sigma = 2,35 \cdot (4\pi z_1^2 e^4 n t)^{1/2} \quad (\text{BOHR})$$

$n$  = densité électronique moyenne de la cible.

\* ORDRES DE GRANDEUR:  ${}^{14}_7\text{N}$  (1 MeV)  $\rightarrow$  Au (10 Å) :

$\left\{ \begin{array}{l} dE/dx \sim 160 \text{ eV}/\text{Å} \Rightarrow \overline{\Delta E} = 3,2 \text{ keV } (\theta = 110^\circ) \\ \Delta_{1/2} \sim 3 \text{ keV, } \underline{\text{QU'IL CONVIENT DE COMPARER A}} \\ \underline{\text{LA DÉCISION EN ÉNERGIE DU DÉTECTEUR}} \end{array} \right.$

### 3.3 CANIER DES CHARGES DU BOLOMÈTRE

- RÉSOLUTION EN ÉNERGIE :  $\sim 2 \text{ keV}$  POUR DES IONS "LOURDS" (C, N...) DE 1 à 2 MeV  
 $\Rightarrow$  RÉSOLUTION EN PROFONDEUR  $\sim 1$  MONOCOUCHE ATOMIQUE
- TAUX DE COMPTAGE RELATIVEMENT ÉLEVÉ  $\sim 1000 \text{ c/s}$

### 4 DOMAINES D'APPLICATION: LA PHYSIQUE DES SURFACES ESTENTIELLEMENT (STRAGGLING DU FAISCEAU)

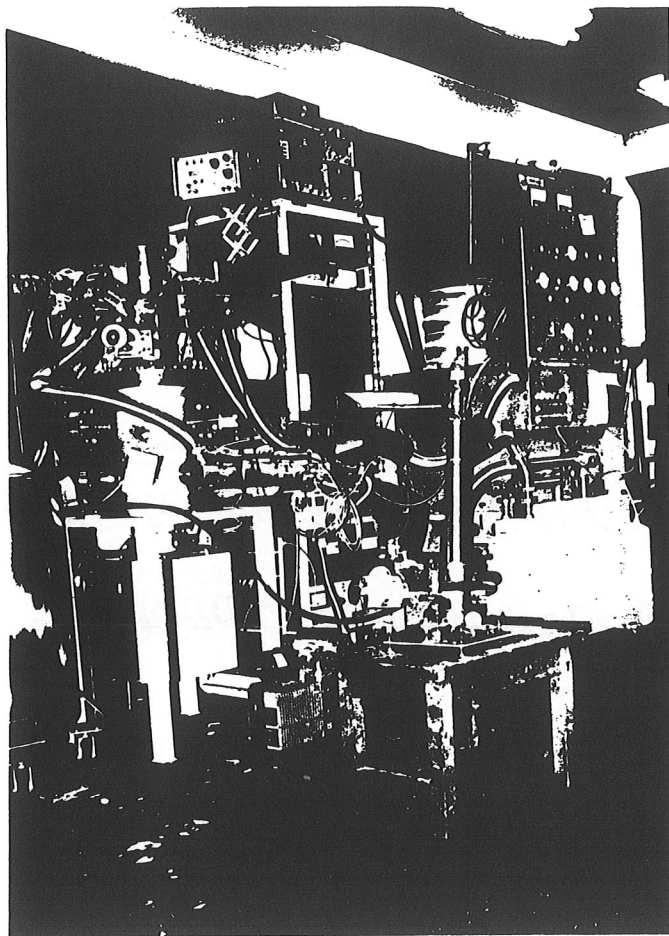
$\rightarrow$  NÉCESSITE UN ENVIRONNEMENT "PROPRE"  
( $P \lesssim 10^{-10} \text{ mb}$  = ULTRA-VIDE).

- MORPHOLOGIE DE FILMS MINCES ET MODES DE CROISSANCE (EN ILOTS, COUCHE PAR COUCHE...)
- PREMIERS STADJ DE LA FORMATION D'ALLIAGES
- MESURE FINE DES PERTES D'ÉNERGIE
- ENDOMMAGEMENT DES MATÉRIAUX SOUS IRRADIATION

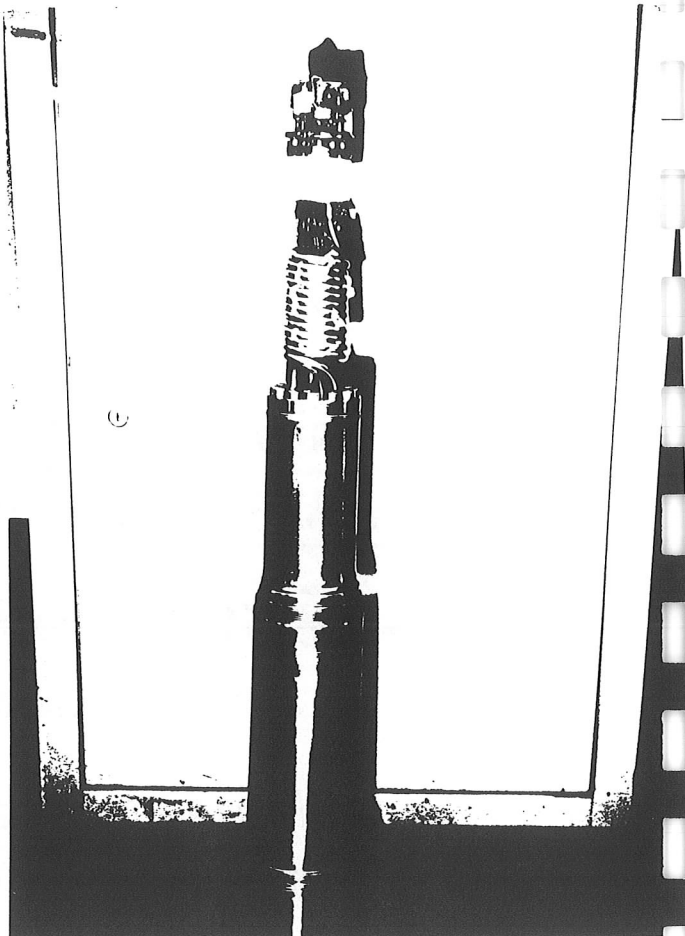
### 5 LE DISPOSITIF MIS EN PLACE AU G.P.S.

- CRYOGÉNIE
- ENCEINTE D'EXPÉRIENCES EN ULTRA-VIDE
- MONTAGE - ACCÉLÉRATEUR

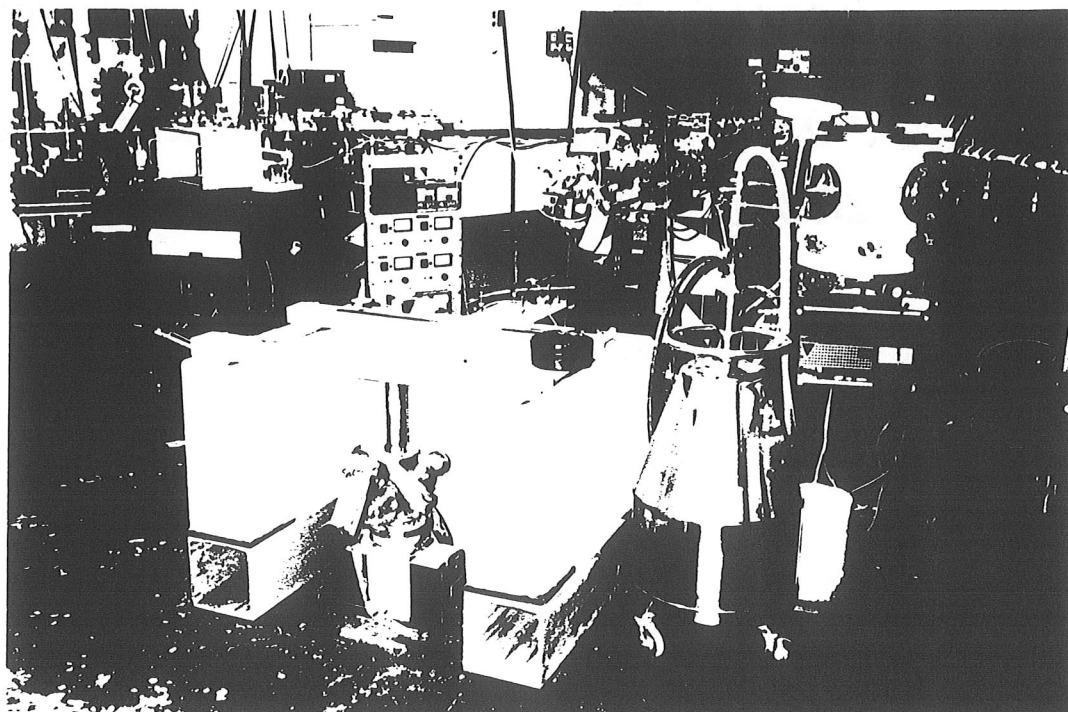
# 5.1 LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL



VUE D'ENSEMBLE



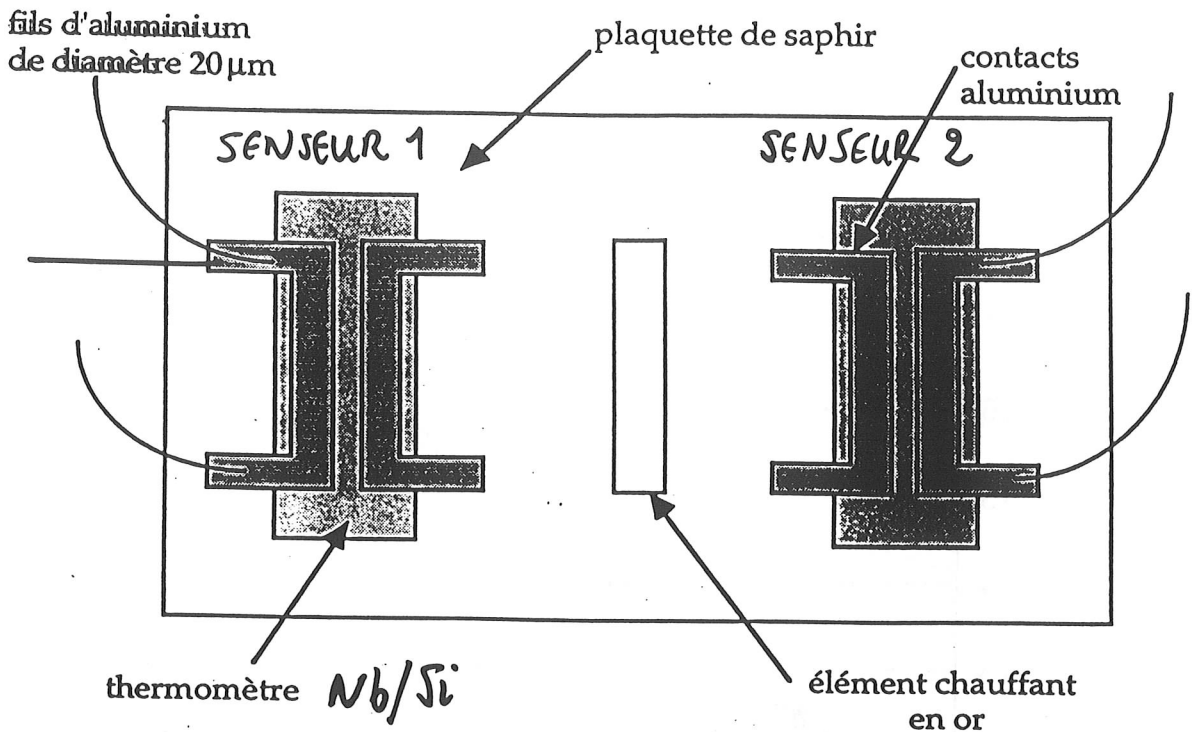
LE CRYOSTAT



SUPPORT DE LA CHAMBRE U.V. ET LIGNE DE FOCUS

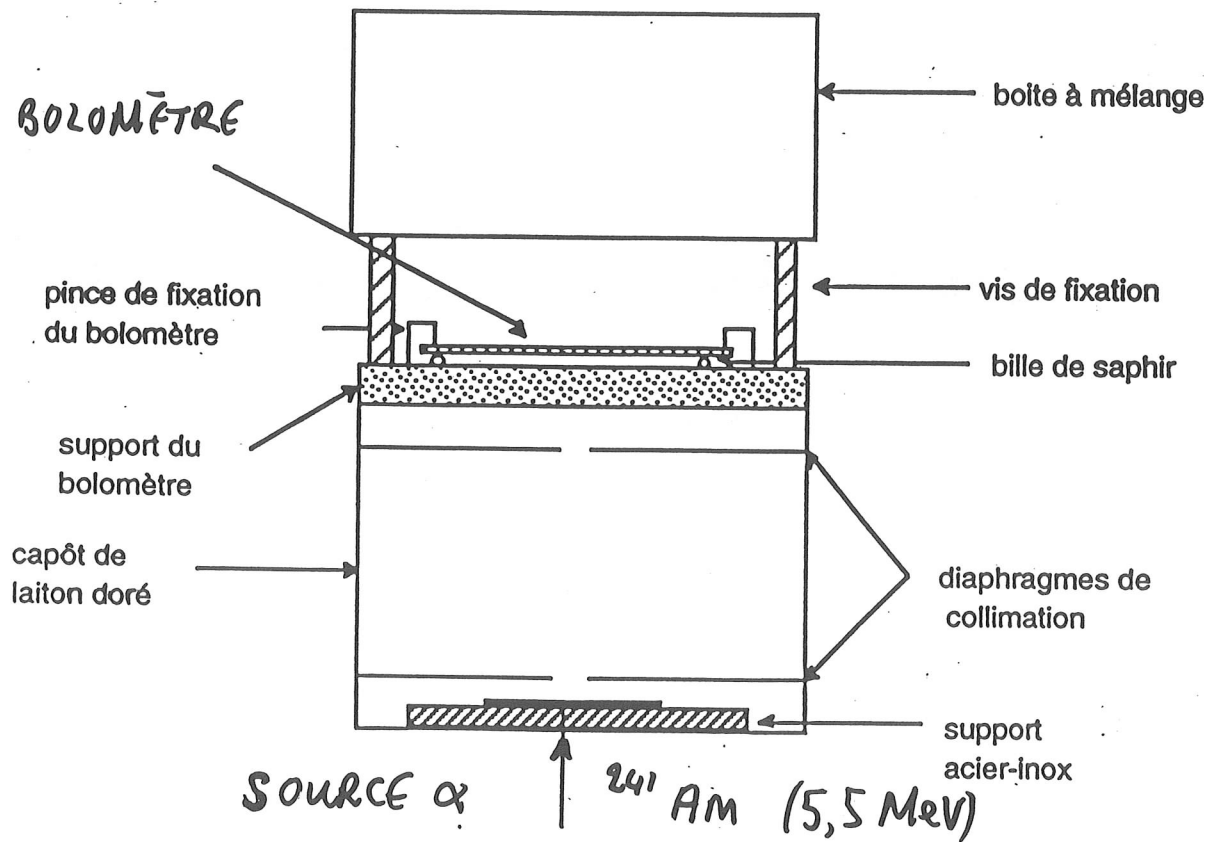
# 5 - ETUDE D'UN BOLOMÈTRE DE TEST (E.S.N.S.M. - G.P.S.)

## ● STRUCTURE DU DISPOSITIF

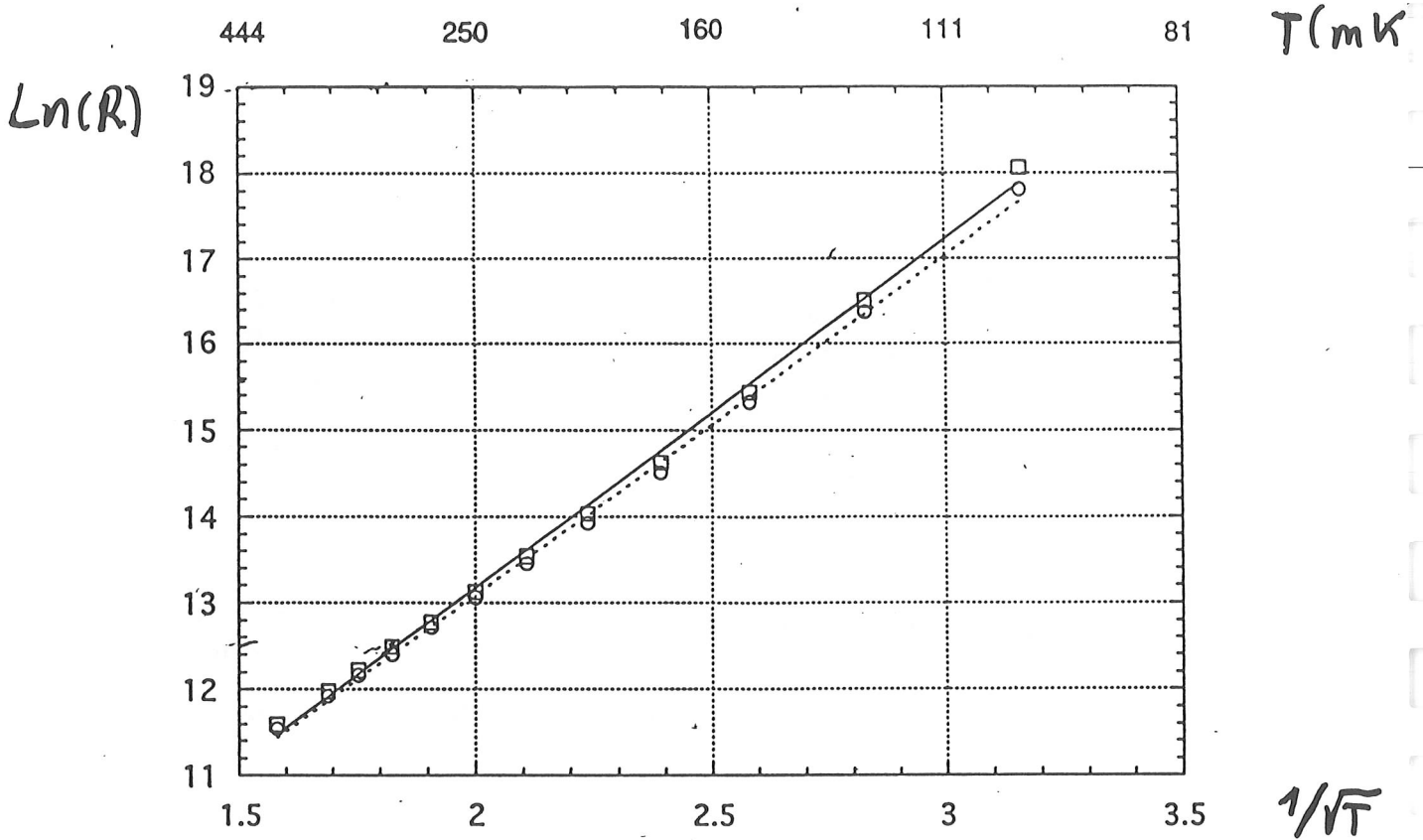


- SUBSTRAT SAPHIR  $(1,2 \times 0,7) \text{ cm}^2 \times 400 \mu\text{m}$
- 2 THERMOMÈTRES EN COUCHE MINCE Nb/Si A LA TRANSITION MÉTAL - ISOLANT.

## ● MONTAGE SUR LA BOÎTE À MÉLANGE DU CRYSTAT



# ③ THERMOMÉTRIE



- LOIS DE TEMPÉRATURE DES SENSEURS 1 (□) ET 2 (○)

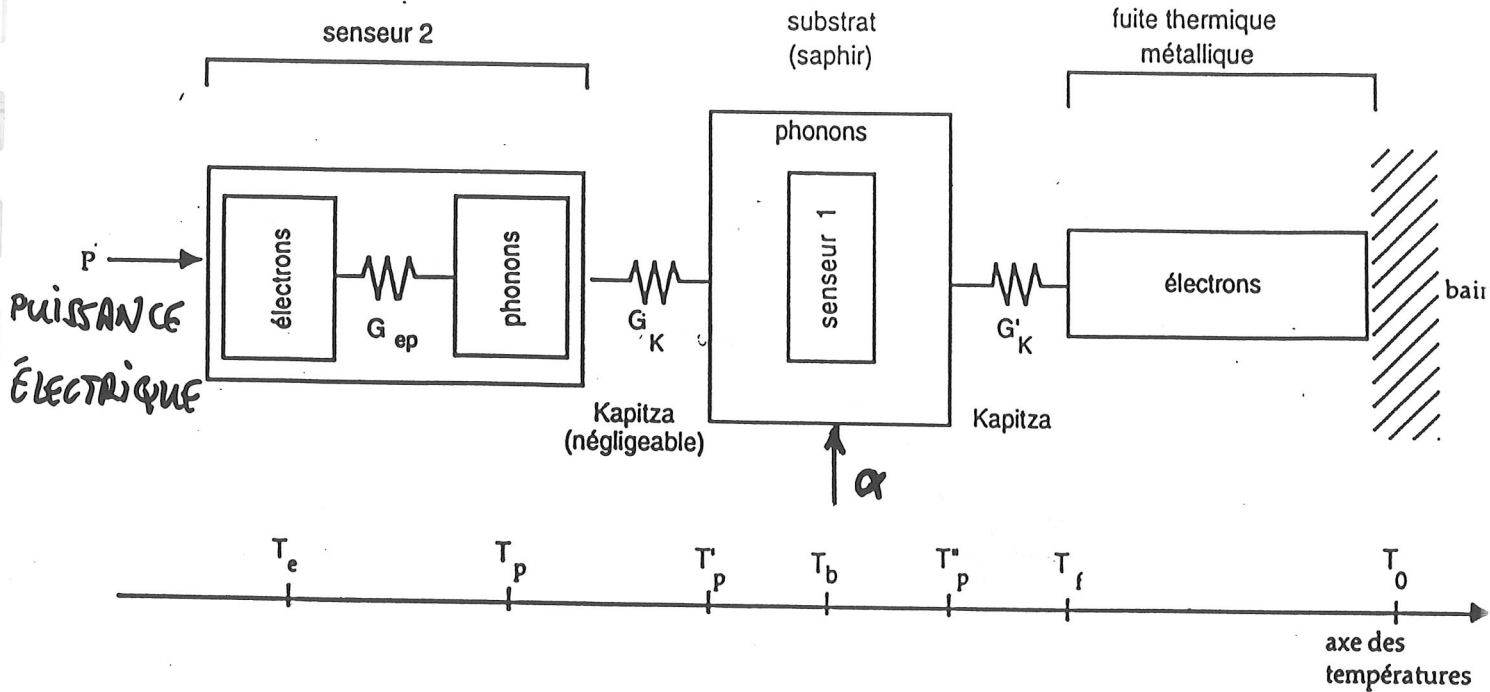
$$R = R_M \exp(T_M/T)^{1/2}$$

SENSEUR 1 :  $R_M = 159,8 \Omega$ ,  $T_M = 16,4 \text{ K}$

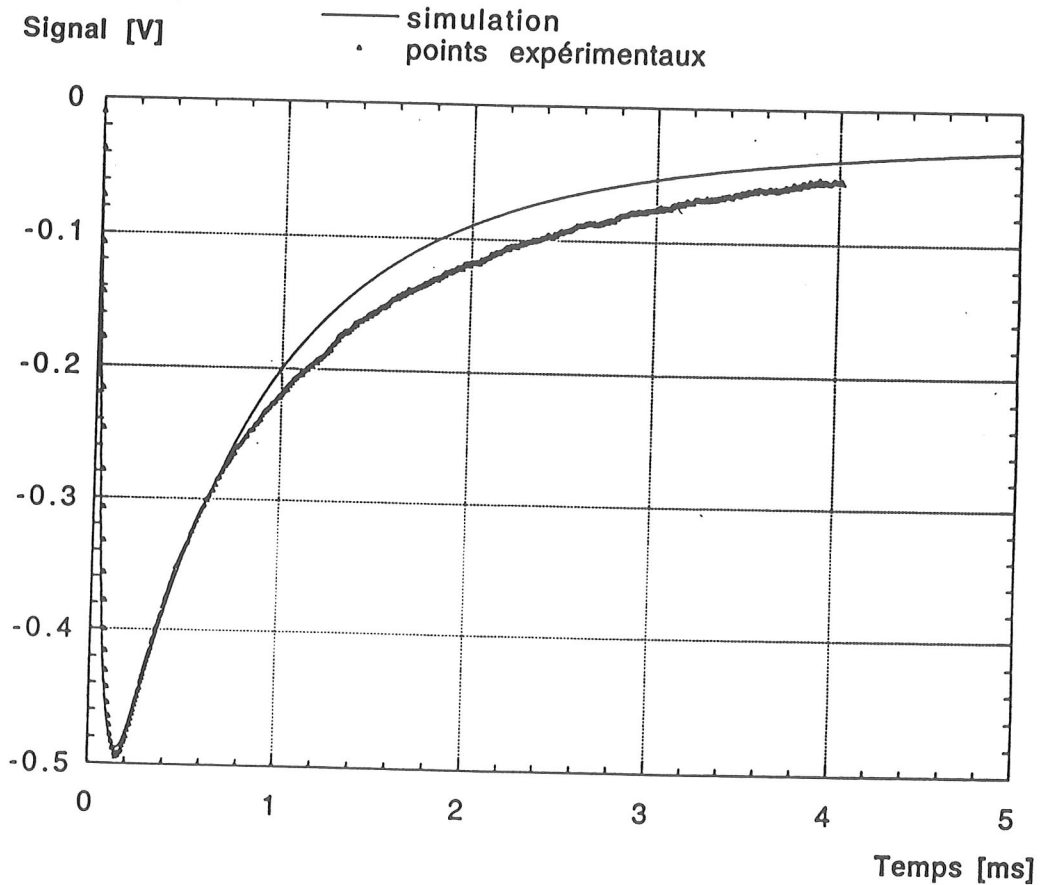
SENSEUR 2 :  $R_M = 181,2 \Omega$ ,  $T_M = 15,6 \text{ K}$

# ● MODÉLISATION DES SIGNAUX

## ● SCHÉMA THERMIQUE DU BOLOMÈTRE

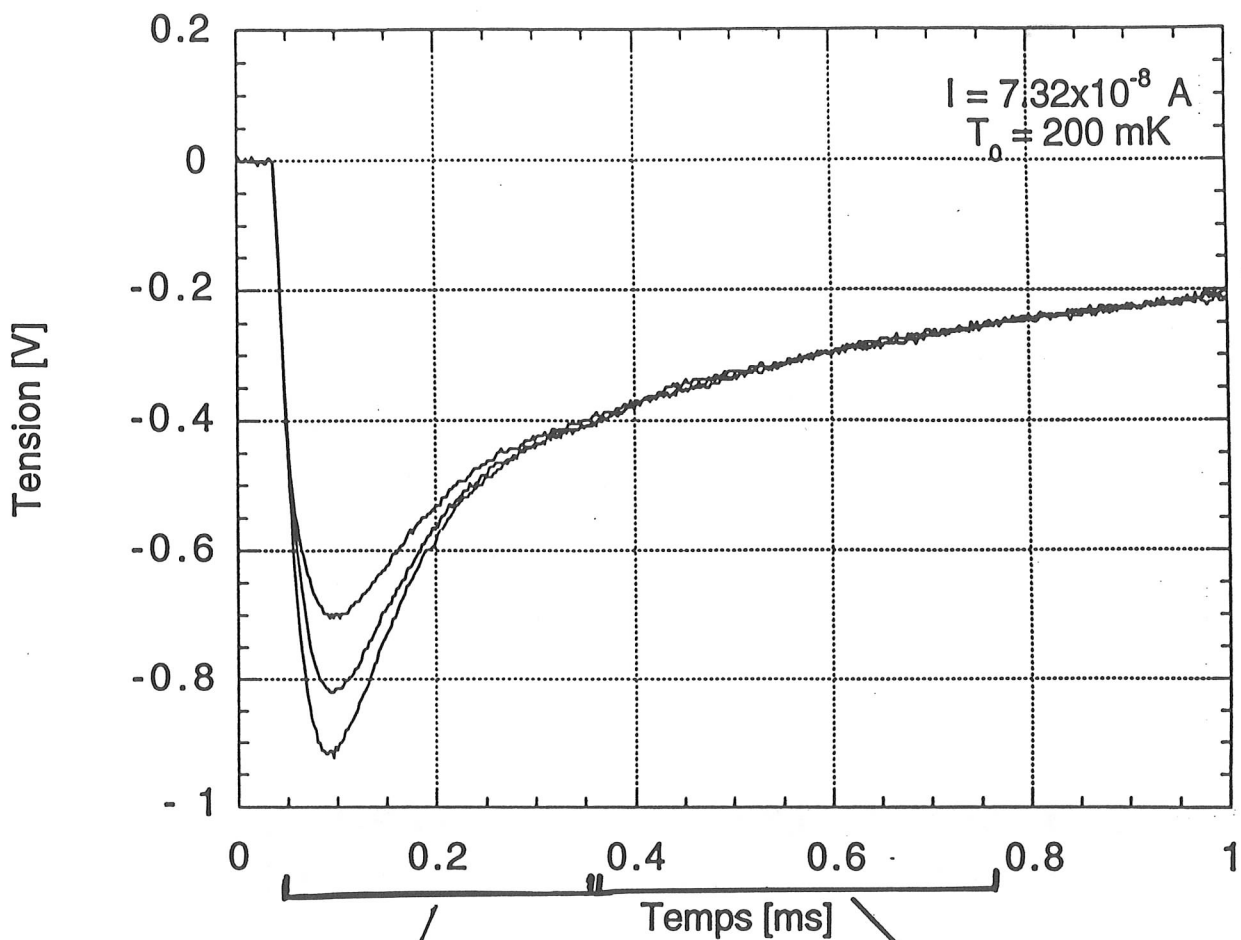


## ● SIMULATION DES SIGNAUX TRANSITOIRES (RÉPONSE A UN $\alpha$ DE 5.5 MeV)

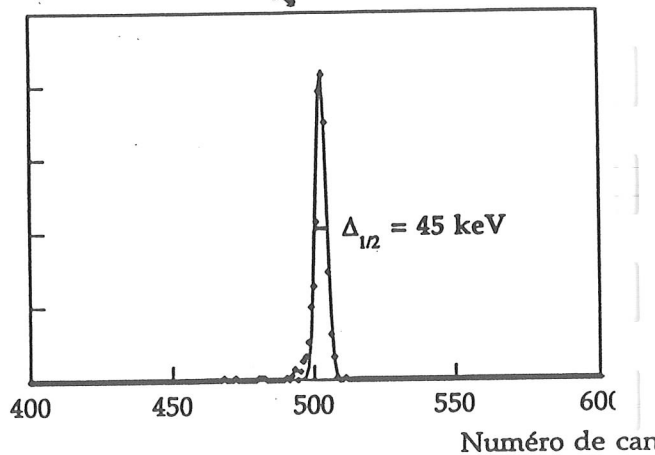
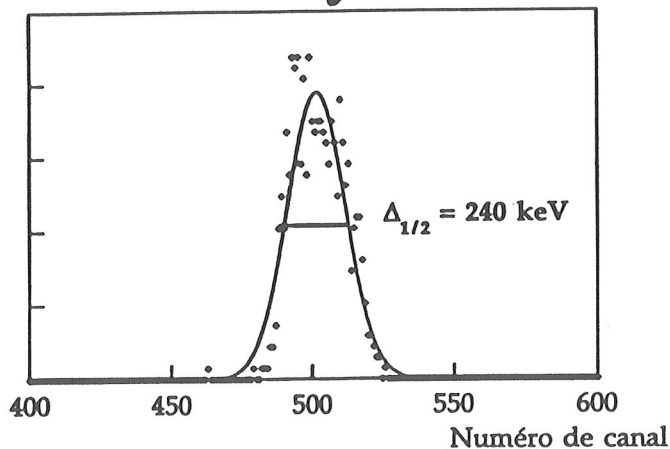


# ● RÉSOLUTION EN ÉNERGIE

● FORME DES SIGNAUX: NOTER LA DISPERSION AUX TEMPS COURTS.



Echelle arbitraire



● SPECTRES OBTENUS PAR INTÉGRATION DU SIGNAL SUR LES INTERVALLES DE TEMPS INDICÉS